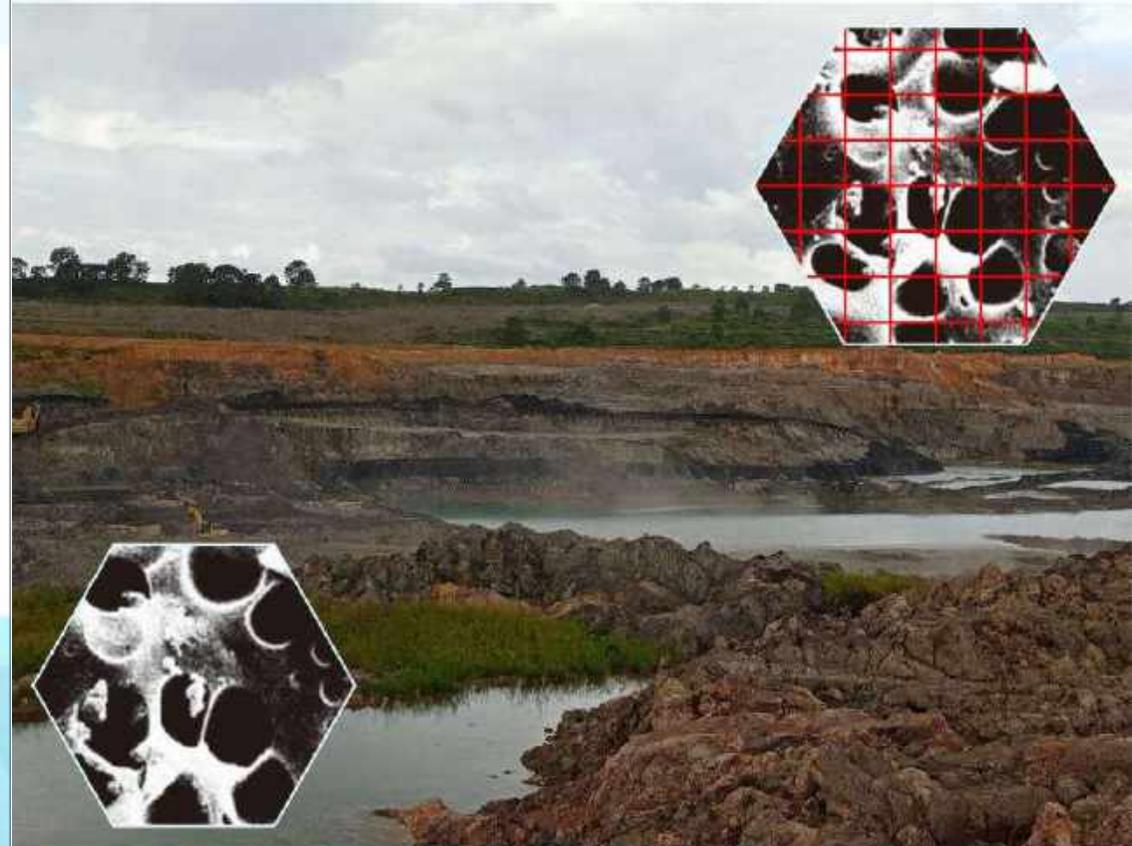


APLIKASI FRAKTAL DALAM EKSPLORASI GAS METANA BATUBARA



Dr. Ir. Sugeng, MT.
Dr. Ir. Basuki Rahmad, MT.
Ir. Ketut Gunawan, MT.



Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat
(LPPM)

Universitas Pembangunan Nasional "Veteran"
Yogyakarta
2022

ISBN 978-623-389-124-0



9 786233 891240

APLIKASI FRAKTAL DALAM EKSPLORASI

GAS METANA BATUBARA

Penulis dilahirkan di Padang, 7 Mei 1966

Riwayat pendidikan :

Sarjana S1, (Insinyur), Jurusan Teknik Geologi, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, Sarjana S2 (Magister Teknik), di Institut Teknologi Bandung (ITB) dan Sarjana S3 (Doktor), di Institut Teknologi Bandung (ITB).

Riwayat pekerjaan penulis :

- Tahun 1988 s/d 1991 Asisten Dosen Kristalografi-Mineralogi
- Tahun 1993 s/d 1994 Geologist PT. Marunda Graha Mineral, Bidang Eksplorasi Batubara di Kecamatan Laung Tuhup, Kab. Barito Utara, Kalimantan Tengah.
- Tahun 1994 s/d sekarang, Dosen Tetap di Jurusan Teknik Geologi Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, pengajar mata kuliah : Geologi Batubara, Eksplorasi Batubara dan Gas Metana Batubara (*Coalbed Methane*)
- Tahun 2004 penulis mengikuti pendidikan dan pelatihan Eksplorasi dan Survey Tambang Batubara Bawah Tanah, di Nagasaki *Coal Mining Technology*, Mitsui Matsushima Resources (MMR), NEDO - Jepang selama 6 (enam) bulan.
- Sejak tahun 1999 s/d sekarang, penulis melakukan penelitian Geologi Batubara, Eksplorasi Batubara serta penelitian *Coalbed Methane* (CBM) dan shale hidrokarbon di Kalimantan dan Sumatra.

Anggota Persatuan Insinyur Indonesia (PII) no. anggota: 1205.05.028603. Anggota Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI) no anggota: 5689.



Dr. Ir. Sugeng, MT
Dr. Ir. Basuki Rahmad, MT
Ir. Ketut Gunawan, MT



Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat
(LPPM)
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”
Yogyakarta
2022

PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan buku ini. Maksud penyusunan buku ini adalah untuk memberikan wawasan tentang parameter apa saja yang perlu diperhatikan saat melakukan eksplorasi gas metana batubara yang sampai saat ini parameter fractal dan HGI belum diterapkan dalam eksplorasi gas metana, untuk itu penulis memberanikan diri untuk menulis buku ini. Buku ini penulis susun berdasarkan kajian pustaka dan pengalaman pribadi penulis selama mendalami gas metana batubara baik melalui studi bersama, penelitian maupun kegiatan eksplorasi awal gas metana batubara.

Penulis selalu terbuka menerima kritik dan saran demi kesempurnaan dalam penyusunan buku ini, Semoga buku ini bermanfaat.

Yogyakarta, Juli 2022

Tim Penulis

Tentang Penulis

Sugeng dilahirkan di Bantul, 8 Desember 1958, Yogyakarta. Seluruh pendidikan dari SD, SMP, dan STM Pembangunan diselesaikan di Yogyakarta. Penulis menyelesaikan pendidikan tingginya di Jurusan Teknik Geologi Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta pada tahun 1988.

Pendidikan Magister di bidang Rekayasa Pertambangan dengan bidang kajian eksplorasi di Institut Teknologi Bandung di selesaikan pada tahun 1999.

Pendidikan Doktor di bidang Geologi dengan kajian Fraktal dan penyerapan gas metana batubara di UPN “Veteran” Yogyakarta lulus tahun 2021.

Pada tahun 2010 – 2016 menjabat Ketua Program Studi S1 di Prodi Teknik Geologi UPN “Veteran”, pada saat ini penulis menjabat Ketua Laboratorium Geokomputasi di Teknik Geologi UPN “Veteran”

Pada tahun 2008 sampai dengan 2014 melakukan studi bersama dalam eksplorasi gas metana batubara di Indonesia.



15. Zhou, S., Liu, D., Cai, Y., Yao, Y., Che, Y., and Liu, Z. (2017): Multi-scale fraktal characterizations of Lignite-Sub Bituminous, subBituminous dan high-volatile Bituminous coals pores by mercury intrusion porosimetry, *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, vol. 44, pages 338 – 350.

DAFTAR ISI

PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
DAFTAR TABEL.....	v
1. Pendahuluan.....	1
2. Rumusan Masalah.....	7
3. Geometri Fraktal.....	9
4. Gas Metana Batubara.....	24
5. Porositas batubara.....	32
6. Scan Electronic Mickroskopy (SEM) Batubara.....	37
7. Hasil Penelitian.....	41
___ 7.1 Analisis Proksimat Batubara.....	41
___ 7.2 Analisis Serapan Gas Metana.....	43
___ 7.3 Analisis Dimensi Fraktal.....	45
7.4 Hasil Uji HGI (Hardgrove Grindability Index).....	47
8. Pori-Pori Batubara.....	49
9. Dimensi Fraktal Pori Terhadap Peringkat Batubara (<i>Rank</i>).....	54
10. Variasi Dimensi Fraktal Pori Terhadap Penyerapan Gas.....	57
11 Variasi Dimensi Fraktal Pori Terhadap HGI.....	60
Daftar Pustaka.....	62
Tentang Penulis.....	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Potensi Cekungan Batubara penghasil Gas Metana Batubara (<i>Coalbed Methane/CBM</i>) di Indonesia (Stevens and Hadiyanto, 2004).....	2
Gambar 2. Model Segitiga Sierpinski (Kusumayudha, 2005).....	12
Gambar 3. Bentuk Geometri <i>Euclidean</i>	13
Gambar 4. Perhitungan manual metode <i>box counting</i> dengan $r = 12$	15
Gambar 5. Perhitungan manual metode <i>box counting</i> dengan $r = 14$	16
Gambar 6. Perhitungan manual metode <i>box counting</i> dengan $r = 116$	17
Gambar 7. Perhitungan manual metode <i>box counting</i> dengan $r = 132$	18
Gambar 8. Perhitungan manual metode <i>box counting</i> dengan $r = 164$	19
Gambar 9. Perhitungan manual metode <i>box counting</i> dengan $r = 1128$	20
Gambar 10. Hasil plot <i>Box Counting</i> , hubungan antara jumlah kotak dengan sisi kotak.....	21
Gambar 11. Model Fraktal <i>Double Porosity</i> (matriks dan rongga) <i>Sierpinski Carpet</i> (Kusumayudha, 2005)	23
Gambar 12. Model fraktal <i>triple porosity</i> (matriks, rekahan, dan rongga) <i>fissured menger sponge</i> (kusumayudha, 2005)	23
Gambar 13. Keberadaan gas pada pori-pori matrik batubara	25
Gambar 14. Tabung <i>Pressure Transmitter</i> dan <i>Oven Isotherm</i>	30
Gambar 15. Kurva antara tekanan dan volume serapan gas	31
Gambar 16. Porositas <i>Macro Cleat</i> , <i>Micro Cleat</i> , dan Matrik (Mucharam, 2007).....	37

11. Rahmad, B. (2013): *Model Pengembangan Genesa Batubara Muara Wahau Kalimantan Timur Berdasarkan Karakteristik Maseral, Geokimia Organik dan Isotop Karbon Stabil*, Disertasi ITB.
12. Wang, L.L. (2017): Characteristics of pore structure and fraktal dimension of low rank coal, a case study of lower Jurassic Xishanyao coal in Southern Junggar Basin, NW China, *Fuel*, 193, 254 – 264.
13. Yao, Y., Liu, D., Tang, D., Tang, S., Huang, W., Liu, Z., and Che, Y. (2009): Fraktal characterization of seepage-pores of coals from China: An investigation on permeability of coals, *Computers & Geosciences*, 35, 1159 -1166.
14. Zhang, S., Tang, S., Tang, D., Huang, W., and Pan, Z. (2014): Determining fraktal dimensions of coal pores by FHH model: problems and effects, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 21, pp. 929-939.

6. Liu, X.F., and He, X.Q. (2016): Effect of pore characteristics on coalbed methane Adsorption in middle-high coal ranks. *Adsorption*, 23, 3–12.
7. Laubach, S.E., Marrett, R.A., Olson, J. E., and Scot, A.R. (1998): Characteristics and origins of coal cleat: A review, *International Journal of Coal Geology*, vol.35, pages 175 – 207.
8. Mavor, M.J., and Nelson, C. (1977): *Coalbed gas in place methodology and error summary*, In *Coalbed reservoir gas in place analysis*, Gas Research Institute.
9. Mastalerz, M., Gluskoter, H., and Rupp, J. (2004): Carbon dioxide and methane sorption in high volatile Bituminous coals from Indiana, USA, *International Journal Coal Geology*, 60, 43-56.
10. Moore, T.A., and Mares, T.E. (2008): The influence of macroscopic texture on biogenically-derived coalbed methane, Huntly coalfield, New Zealand, *International Journal of Coal Geology*, vol. 76, 175 – 185.

Gambar 17. Prosedur mencari dimensi fraktal pori (d).....	40
Gambar 18. Foto hasil SEM pada batubara peringkat <i>lignite</i> dengan perbesaran 2000 x	50
Gambar 19. Foto hasil SEM pada batubara peringkat <i>subbituminous</i> dengan perbesaran 2000 x	51
Gambar 20. Foto hasil SEM pada batubara peringkat <i>bituminous</i> dengan perbesaran 2000 x	51
Gambar 21. Hubungan antara dimensi fractal dengan peringkat batubara	56
Gambar 22. Hubungan antara serapan gas metana dengan dimensi fractal.....	61

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Summary of Typical CBM Reservoir Properties of Indonesian Coal Basin (Stevens and Hadiyanto, 2004).....	3
Tabel 2. Hasil analisis proksimat batubara <i>lignite – subbituminous</i> dan batubara <i>bituminous</i>	44
Tabel 3. Hasil uji serapan gas metana pada batubara peringkat <i>lignite – subbituminous</i> dan <i>bituminous</i> Error! Bookmark not defined.	
Tabel 4. Nilai dimensi fraktal, porositas dan permeabilitas batubara peringkat <i>bituminous</i>	46
Tabel 5. Nilai dimensi fraktal, porositas dan permeabilitas batubara peringkat <i>lignite – subbituminous</i>	47
Tabel 6. Hasil uji HGI pada batubara peringkat <i>lignite – subbituminous</i> dan <i>bituminous</i>	48

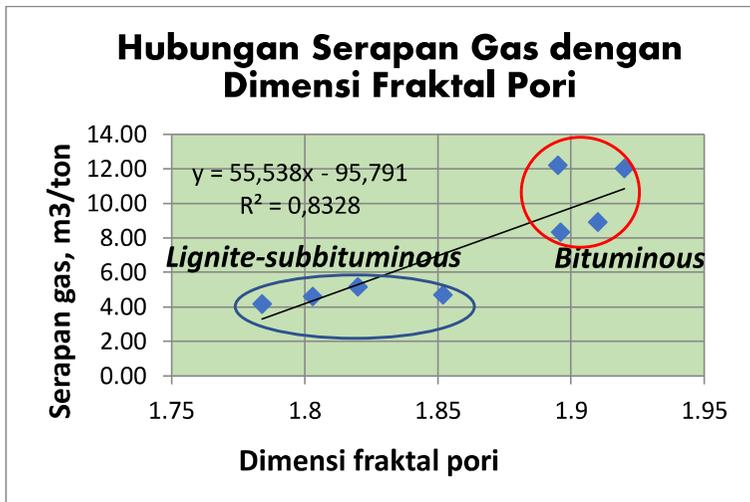
1. Pendahuluan

Gas Metana Batubara (GMB) adalah gas bumi (hidrokarbon) dengan gas metana sebagai komponen utamanya. Gas metana ini secara umum terbentuk secara alamiah dalam proses pembentukan batubara, dalam kondisi terperangkap dan terserap (*adsorbed*) di dalam lapisan batubara oleh air dan tekanan yang berupa rekahan (*cleat*) dan matriks, sehingga kedalaman lapisan batubara merupakan salah satu faktor penting dalam kegiatan pengembangan lapangan gas metana batubara, semakin dalam lapisan batubara maka gas yang terserap dalam batubara semakin besar.

Permintaan akan energi khususnya gas yang terus meningkat, baik untuk konsumsi Nasional atau Regional, selain berasal dari produksi gas secara konvensional maka gas metana batubara (GMB) adalah sebagai sebuah alternatif industri energi non konvensional perlu di tingkatkan dan di kembangkan di Indonesia mengingat tersedianya potensi pasar untuk penjualan gas alam. Potensi gas metana batubara di Indonesia mencapai 453 Tcf yang tersebar di 11 cekungan batubara daratan (Gambar 1) yaitu Sumatra Selatan 183 Tcf; Barito 81 Tcf; Kutei 80 Tcf; Sumatra bagian tengah 52,5 Tcf;

DAFTAR PUSTAKA

1. Cai, Y., Liu, D., Pan, Z., Che, Y., and Lin, Z. (2016): Investigation the Effects of Seepage – Pores and Fractures on Coal Permeability by Fraktal Analysis, *Transp Porous Med* 111, pages 479 – 497.
2. Firtiansyah, B.S., Pulungan, L., Guntoro, D. (2021): Analisis Ukuran Partikel dan Nilai HGI (Hardgroove Grindability Index) dari Beberapa Jenis Batubara, *Prosiding Teknik Pertambangan*, Vol.7, No.2.
3. Flores, R.M. (2014): *Coal and Coalbed Gas*, Waltham, MA, Elsevier.
4. Hao, N., Wang, Y., Mao, L., and Liu, Q. (2013): The Fraktal Characteristic Analysis of Coal Pore Structure Based on Mercury Intrusion Porosimetry, *Applied Mechanics and Materials*, vol.5, 353 – 356.
5. Kusumayudha, S.B. (2005): *Hidrogeologi Karst Dan Geometri Fratal*, Penerbit Adicita.



Gambar 22. Hubungan antara serapan gas metana dengan dimensi fractal.

Struktur pori batubara berkaitan dengan keberadaan gas metana batubara, sementara struktur pori ada kaitannya dengan tingkat kegerusan batubara atau HGI sehingga HGI dapat digunakan untuk mengetahui serapan gas dan volume gas, walaupun HGI bukan parameter utama berkaitan dengan serapan gas dan volume gas tapi bisa dipakai sebagai acuan di dalam menentukan serapan gas dan volume gas pada saat melakukan eksplorasi CBM.

dan Tarakan Utara 17,5 Tcf. Selanjutnya, wilayah Berau mencapai 8,4 Tcf; Bengkulu 3,6 Tcf; Pasir Asem Tiga Tcf, Sulawesi 2,0 Tcf; Jawa bagian timurlaut 0,8 Tcf dan Ombilin 0,5 Tcf (Hadiyanto, 2004); (Tabel 1).



Gambar 1. Potensi Cekungan Batubara penghasil Gas Metana Batubara (Coalbed Methane/CBM) di Indonesia (Stevens and Hadiyanto, 2004)

Tabel 1. Summary of Typical CBM Reservoir Properties of Indonesian Coal Basi (Stevens and Hadiyanto, 2004)

No	Basin	Province	Target Formation	Complete-able Coal Thickness (m)	Coal Rank (R _o %)	Avg Depth (m)	High-Graded (t/m ²)	CBM Resources	
								Completable (Tcf)	Concentration (Bcf/m ³)
1	S.Sumatra	Sumatra	M. Enim	37	0.47	762	7.350	183.0	24.9
2	Barito	Kalimantan	Warukin	28	0.45	915	6.330	101.6	16.0
3	Kutei	Kalimantan	Prangat	21	0.50	915	6.100	80.4	13.2
4	C.Sumatra	Sumatra	Petani	15	0.40	762	5.150	52.5	10.2
5	N.Tarakan	Kalimantan	Tabul	15	0.45	701	2.734	17.5	6.4
6	Berau	Kalimantan	Lati	24	0.45	671	0.780	8.4	10.8
7	Ombilin	Sumatra	Sawahunto	24	0.80	762	0.47	0.5	10.7
8	Pasir/Asem	Kalimantan	Warukin	15	0.45	701	0.385	3.0	7.9
9	NW Java	Java	T. Aker	6	0.70	1524	0.100	0.6	7.6
10	Sulawesi	Sulawesi	Toraja	6	0.55	610	0.500	2.0	4.0
11	Bengkulu	Sumatra	Lemau	12	0.40	610	0.772	3.6	4.7
Total							30.248	453.3	15.0

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil batubara yang cukup besar di dunia, hanya saja batubaranya secara umum mempunyai peringkat rendah (*lignite – subbituminus*) sehingga jenis gas yang dihasilkan adalah gas biogenik, selain itu karakteristik mikrokopis maseral batubara Indonesia adalah hampir sama yaitu rata-rata kandungan vitrinite 87,95 % (vol.), liptinite 7,42 % (vol.) dan inertinite

Luas pori-pori dan volume pori-pori tidak mempunyai hubungan secara langsung dengan penyerapan gas karena penyerapan gas dipengaruhi oleh bentuk permukaan pori-pori apakah bentuknya teratur atau tidak teratur.

11 Variasi Dimensi Fraktal Pori Terhadap HGI

Berdasarkan hasil analisis dari conto batubara baik pada peringkat *lignite – subbituminous* dan *bituminous* menunjukkan bahwa ada hubungan yang negative. Hal ini menunjukkan semakin besar dimensi fractal akan semakin kecil HGI demikian sebaliknya. Hubungan ini menggambarkan bahwa ada keterkaitan antara stuktur pori batubara (ukuran, bentuk, dan sebaran pori) dengan kekerasan dari batubara. Batubara dengan system pori yang sudah teratur akan mempunyai nilai HGI yang rendah, sebaliknya struktur pori yang tidak teratur akan mempunyai nilai HGI yang tinggi artinya batubara tersebut akan mudah digiling.

pembatubaraan dan komposisi maseral memiliki efek yang berbeda pada permukaan pori-pori dan hubungan antar pori-pori sehingga menyebabkan perbedaan batubara dalam menyerap gas. Serapan gas metana dipengaruhi oleh maseral, *rank*, *moisture*, *mineral matter*, perubahan parameter tersebut akan menyebabkan perubahan serapan gas.

Hubungan antara dimensi fraktal pori dengan volume penyerapan gas metana batubara dapat dilihat pada gambar 22 di bawah ini, gambar dibawah menunjukkan korelasi penyerapan gas metana dengan dimensi fraktal pori mempunyai korelasi positif dengan $R^2 = 0.8328$. Gambar dibawah menunjukkan bahwa perbedaan dimensi fraktal pori pada batubara menyebabkan perbedaan batubara di dalam menyerap gas. Batubara *lignite – subbituminous* mempunyai dimensi fraktal pori rendah karena pori-pori batubara tersusun oleh mikropori dan mesopori yang terdistribusi tidak merata sehingga penyerapan gas metana kecil. Batubara *bituminous* mempunyai dimensi fraktal pori lebih besar karena mempunyai mesopori dan mikropori terdistribusi merata sehingga penyerapan gas metana lebih tinggi.

sekitar 5 % (vol.) (Daulay, 1994, Anggayana, 1996; Amijaya, 2005; dan Widodo, 2008 dalam Basuki Rahmad, 20)

Menurut Mavor dan Nelson (1997), batubara merupakan reservoir gas metana dengan struktur pori-pori yang heterogen seperti ukuran, bentuk, dan distribusi pori-pori yang tidak beraturan, namun demikian antar pori-pori saling terhubung melalui media antar pori-pori dalam matriks dan *cleat* (rekahan batubara), oleh karena itu struktur pori-pori batubara dapat berfungsi sebagai penyerap gas (*gas adsorption*) dan penyimpanan gas (*gas content*). Struktur pori-pori batubara relatif lebih kompleks dibanding dengan struktur pori-pori reservoir konvensional seperti di batupasir. Nilai serapan gas metana batubara baik secara vertikal maupun lateral di lapisan batubara adalah bervariasi. Hal ini disebabkan oleh perubahan karakteristik maseral dan kualitas batubaranya seperti: *rank* (*reflektansi vitrinite & kalori*), kandungan *moisture* dan kandungan *mineral matter*. Proses serapan gas metana dalam batubara merupakan proses melekatnya molekul gas yang berada pada fase cair di permukaan pori-pori melalui ikatan kimia dan fisika dengan jumlah gas yang terserap bisa mencapai lebih dari 95%. Hal ini yang disebut sebagai *gas adsorption* (gas yang terserap)

dan sisanya disebut sebagai *free gas* (gas bebas). Menurut Mastalerz et al. (2004), maseral *vitroinite* merupakan maseral utama penghasil gas metana yang berasal serat tumbuhan berkayu serta memiliki kemampuan menyerap gas metana yang besar, maseral *vitroinite* juga merupakan matrik pori-pori.

Menurut Zhang et al. (2014), karakteristik struktur pori-pori batubara seperti ukuran pori-pori, bentuk pori-pori dan distribusi pori-pori adalah saling berhubungan. Kondisi seperti ini disebabkan oleh fasies batubara yaitu perubahan lingkungan rawa gambut dan jenis tumbuhan. Oleh karena itu perubahan fasies batubara dapat untuk menentukan karakteristik maseral batubara yang berfungsi sebagai matrik pori-pori yaitu mikropori, mesopori, dan makropori. Berlimpahnya volume pori-pori pada matrik batubara (mikropori, mesopori, dan makropori) adalah berhubungan dengan komposisi bahan organik pembentuk batubara (maseral) dan *rank* (kalori). Fasies batubara dapat menentukan lingkungan rawa gambut pembentuk batubara serta menentukan *rank* (peringkat batubara). Dengan demikian hubungan antara fasies batubara dan karakteristik maseral batubara dapat menentukan dimensi pori-pori

metode umum (secara statistik) yang dapat menjelaskan sifat-sifat fraktal (Kusumayudha, 2005). Pendekatan perhitungan dimensi fraktal pori secara statistik sangat efektif dilakukan menggunakan metode *box Counting* (Sumantri, 2005, Ferani, 2010, Zhang et al, 2014, Liu & Nie, 2016).

Dimensi fraktal pori merupakan sifat intrinsik permukaan pori-pori batubara dan struktur batubara yang berkaitan dengan peringkat batubara dan komposisi maseral (Yao et al, 2009, Nie et al, 2016). Pori-pori batubara termasuk bentuk pori-pori, distribusi pori-pori, dan ukuran pori-pori saling berhubungan menentukan porositas dan permeabilitas batubara selanjutnya mempengaruhi serapan dan transportasi gas (Cai et al, 2011, Liu et al, 2015). Pori-pori yang berbeda mempunyai efek berbeda pada kemampuan serapan gas metana. Pori-pori berukuran mikropori dan mesopori adalah ruang utama untuk penyerapan gas metana. Luas permukaan pori-pori secara inheren terkait dengan distribusi ukuran pori-pori, dimana luas permukaan pori-pori semakin meningkat menyebabkan penurunan ukuran pori-pori dan volume pori-pori (Chalmer dan Bustin, 2006). Proses

pori. Gambar diatas mengekspresikan bahwa di batubara peringkat *Bituminous* mengalami peningkatan nilai dimensi fraktal sesuai dengan peningkatan nilai reflektansi vitrinit.

10. Variasi Dimensi Fraktal Pori Terhadap Penyerapan Gas

Geometri fraktal sangat efektif digunakan untuk mengkarakterisasi pori-pori yang tidak beraturan dan permukaan yang kasar pada material yang poreous termasuk batubara dan *shale* (Zhang et al, 2014, Liu & Nie, 2016). Secara luas teori fraktal dipergunakan untuk mempelajari pori-pori dan rekahan batubara (Cai et al, 2011, Wang, 2017). Penggunaan fraktal dapat membantu mengetahui penyimpanan dan transportasi gas metana melalui pemahaman porositas batubara (Liu & Nie, 2016). Porositas batubara dianggap sebagai batuan berpori-pori dapat dimodelkan sebagai kumpulan pipa kapiler tidak beraturan. Secara umum objek-objek alam termasuk struktur pori-pori batuan dan batubara dikelompokkan sebagai fraktal *stokastik* atau fraktal statistik (Sumantri, 2005, Liu & Nie, 2016,). Perhitungan fraktal pori-pori akan lebih baik menggunakan

batubara, kandungan gas (*gas content*) dan permeabilitas reservoir batubara (Zhang et al., 2014). Menurut Zhou et al. (2017), akibat perubahan fasies batubara menyebabkan perubahan karakteristik maseral batubara, disamping itu perubahan *rank*, *moisture* dan *mineral matter* (seperti: *pyrite*) dapat menyebabkan perubahan penyerapan gas.

Zhang et al. (2014) dan Liu & Nie (2016), menjelaskan bahwa secara umum sifat pori-pori batubara (bentuk, distribusi, dan ukuran pori-pori) adalah tidak beraturan (kompleks), sehingga untuk mengetahui dimensi pori-pori batubara yaitu dengan cara analisis geometri fraktal. Metode geometri fraktal adalah metode yang sangat efektif untuk menentukan karakter kondisi permukaan pori-pori batubara yang tidak beraturan yang menghasilkan dimensi fraktal pori batubara. Secara umum analisis geometri fraktal dapat digunakan untuk menentukan pori-pori batubara baik dalam matrik maupun *cleat* (rekahan batubara) (Cai et al, 2011; Wang, 2017).

HGI (Hardgrove Grindability Index) adalah parameter yang menyatakan tingkat kemudahan batubara untuk digerus, HGI menunjukkan kekerasan dari batubara semakin rendah nilai HGI maka batubara akan semakin keras artinya batubara

mempunyai peringkat lebih tinggi, semakin besar nilai HGI akan semakin lunak artinya batubara tersebut mempunyai peringkat yang rendah (Fitriansyah dkk, 2021).

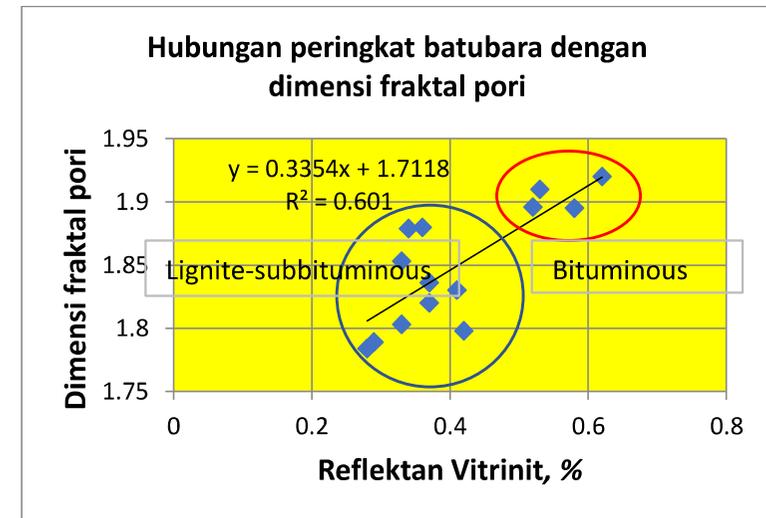
Jadi dimensi fraktal dan HGI keduanya ada keterkaitannya dengan peringkat batubara, sementara besar kecilnya volume penyerapan gas metana batubara salah juga dipengaruhi oleh peringkat batubara.

Berdasarkan keterkaitan parameter-parameter tersebut diatas yaitu: nilai dimensi fraktal, nilai HGI, dan peringkat batubara terhadap volume penyerapan gas metana nantinya dapat dipakai menjadi salah satu parameter di dalam eksplorasi gas metana.

Salah satu lokasi terdapatnya batubara Neogen yaitu batubara dengan peringkat *lignite – subbituminous* dan Paleogen yaitu batubara dengan peringkat bituminous di tersingkap dengan baik di Kalimantan Selatan.

2. Rumusan Masalah

Cekungan Barito merupakan salah satu cekungan yang banyak mengandung lapisan batubara dengan peringkat batubara *Lignite – Sub Bituminous* sampai *Bituminous*.



Gambar 21. Hubungan antara dimensi fractal dengan peringkat batubara

Batubara peringkat rendah mempunyai dimensi fraktal rendah hal ini disebabkan karena pori-pori yang terbentuk pada peringkat ini mempunyai struktur pori tidak baik artinya distribusi pori tidak merata, ukuran butir tidak seragam dan bentuk butir tidak seragamserta pada batubara peringkat ini tersusun oleh mesopore dan mikropori yang terdistribusi tidak merata.

Distribusi pori-pori yang merata, ukuran butir hampir seragam dan bentuk butir yang sama pada batubara peringkat bituminous menyebabkan meningkatkan nilai dimensi fraktal

moisture serta rantai panjang pada OH menurun menyebabkan inti aromatis meningkat secara bersamaan. Batubara peringkat rendah (*Lignite-Sub Bituminous*) mempunyai pori-pori kapiler yang memiliki *moisture* tinggi sehingga terbentuk makropori dan mesopori (Yao et al, 2017). Peningkatan peringkat batubara juga meningkatkan kadar karbon, apabila kandungan karbon relatif tinggi umumnya memiliki dimensi fraktal pori lebih tinggi (Yao et al, 2017).

Hubungan antara peringkat batubara dengan dimensi fraktal, baik untuk peringkat lignite – bituminous dan bituminous dapat dilihat pada gambar 21 dibawah ini.

Gambar diatas menunjukkan hubungan yang positif antara peringkat batubara dengan dimensi fraktal dengan nilai koefisien korelasi ($R^2 = 0,601$). Semakin meningkat peringkat batubara maka akan diikuti dengan naiknya dimensi fraktal pori.

Batubara yang terdapat di Cekungan Barito saat ini sedang dilakukan eksplorasi gas metana batubara. Hasil dari eksplorasi menunjukkan kandungan gas metana batubara bervariasi. Variasi kandungan gas metana batubara ini sangat menarik untuk dilakukan penelitian.

Batubara merupakan reservoir gas metana dipengaruhi oleh maseral batubara dan peringkat batubara. Variasi kandungan maseral mempresentasikan bahan penyusun dimana gambut diendapkan pada suatu lingkungan rawa dengan kondisi fasies berbeda. Perbedaan fasies menyebabkan perbedaan bentuk, ukuran, dan volume pori-pori batubara sebagai media menyimpan dan menyerap gas metana.

Peringkat batubara dapat menyebabkan bentuk, ukuran, dan distribusi pori-pori batubara berbeda. Bentuk, distribusi, dan ukuran pori-pori batubara umumnya tidak teratur, ketidakteraturan pori-pori dapat diketahui dimensinya dengan metode fraktal. Perbedaan peringkat batubara menyebabkan perbedaan dimensi fraktal pori yang akan menyebabkan perbedaan di dalam penyerapan gas metana.

Sehubungan dengan kondisi tersebut maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut: Bagaimana pengaruh perubahan dimensi fraktal pori pada pori-pori batubara

terhadap serapan gas metana pada batubara peringkat dan fasies pengendapan yang berbeda.

3. Geometri Fraktal

Istilah fraktal diperkenalkan pertama kali oleh Benoit Mandelbrot pada tahun 1977 dalam bukunya yang berjudul “*The Fractal Geometry of Nature*”. Fraktal berasal dari bahasa Latin, yaitu kata sifat “*fractus*” dan kata kerja “*frangere*”. “*Frangere*” berarti memecah: membuat fragmen-fragmen yang tidak beraturan. Sebagai tambahan untuk istilah terfragmentasi (seperti dalam fraksi (*fraction*) atau refraksi (*refraction*)), “*fractus*” juga berarti tidak teratur atau terfragmentasi, tetapi juga dapat berarti dimensi fraksional (*fractional dimensional*). Jadi, fraktal adalah benda geometris yang kasar dan tidak teratur. Beberapa fraktal, apabila dipecah dan diambil beberapa bagian kecilnya jika diperbesar akan terlihat mirip dengan fraktal aslinya. Fraktal dikatakan memiliki detail yang tak hingga dan pada tingkat perbesaran yang berbeda, ia memiliki struktur serupa diri dengan fraktal aslinya (Kusumayudha, 2005).

9. Dimensi Fraktal Pori Terhadap Peringkat Batubara (*Rank*)

Proses pembatubaraan, polikondensasi molekul batubara menyebabkan peningkatan peringkat batubara (Wang, 2017). Batubara peringkat rendah (*moisture* > 10%) makropori dan mesopori akan melimpah dan pori-pori terdistribusi tidak merata. Proses pemadatan masal saat proses polikondensasi mengakibatkan peningkatan peringkat batubara serta mesopori dan mikropori terdistribusi secara homogen. Proses polikondensasi molekul batubara yang intensif menyebabkan pemadatan masal merata, sehingga mikropori dan retakan berkembang secara bertahap di dalam batubara (Wang, 2017), akibatnya batubara akan mempunyai struktur pori-pori yang kompleks.

Peningkatan peringkat batubara menyebabkan penurunan *moisture* dan kandungan karbon meningkat, sedang kadar abu tidak menunjukkan tren naik dengan naiknya peringkat batubara. Sensitivitas peringkat batubara rendah terhadap *moisture* pada proses pembatubaraan sangat rendah. Oleh sebab itu *moisture* dapat digunakan sebagai parameter karakterisasi perubahan peringkat batubara secara akurat. Peningkatan peringkat batubara menyebabkan penurunan

Gas yang terbentuk selama proses pembatubaraan baik itu termogenik maupun biogenic akan tersimpan di dalam system pori (mikropori, mesopori, dan makropori) *cleats* atau fraktur yang ada pada batubara melalui proses absorpsi (absorption).

Fraktal mempunyai dua arti yang saling berhubungan: 1. Fraktal adalah bentuk secara berulang atau *self-similar*. 2. Fraktal adalah himpunan matematis, biasanya diperoleh melalui rekursi (pengulangan yang serupa), yang menunjukkan sifat dimensi yang menarik. Fraktal adalah bentuk geometri kasar yang terfragmentasi, dapat dibagi dalam beberapa bagian, dan tiap bagian merupakan tiruan dalam ukuran yang sama besar atau lebih kecil dari bentuk asli keseluruhannya (Mandelbrot, 1983)

Berdasarkan uraian tersebut, fraktal dapat dikatakan sebagai objek geometri yang serupa dengan dirinya sendiri pada semua ukuran skala perbesarannya.

Objek fraktal mempunyai sifat-sifat dasar yang membedakan objek-objek fraktal dengan objek-objek geometri pada umumnya, yaitu:

1. *Self-similarity*, atau sifat keserupaan diri. Sifat ini berarti suatu objek fraktal terdiri dari banyak tiruan yang sama, dari objek fraktal itu sendiri, dengan ukuran yang lebih kecil terlingkupi di dalam bentuk aslinya. Dengan kata lain, terdapat kesamaan di dalam bagian-bagian objek dibanding keseluruhan objek fraktal itu sendiri.

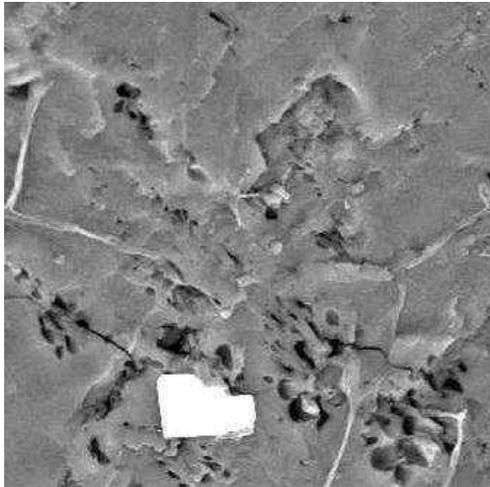
2. *Infinite detail*, atau detil yang tak berhingga. Sifat ini berarti bahwa semakin objek fraktal diperbesar akan didapatkan bentuk objek lebih mendetail. Detail dari objek fraktal tidak terlihat langsung, tetapi akan muncul secara bertahap ketika objek fraktal tersebut dilihat ‘semakin dekat’ dengan perbesaran. Setiap tahap perbesaran yang semakin meningkat akan memunculkan detil-detil baru. Karena itu sifat ini juga berarti bahwa objek fraktal tidak terpengaruh dengan ukuran skala, tidak mempunyai variasi penskalaan (*invariance of scale*).

Dalam geometri *Euclidean* kita telah diperkenalkan dengan dimensi 0, 1, 2, dan 3. Dimensi dapat dibayangkan sebagai sebuah ukuran jumlah titik-titik yang sedang ditinjau. Akan tetapi, meski garis paling tipis sekalipun memiliki tak hingga banyaknya titik, sangat jelas bahwa suatu permukaan atau bidang tentu lebih besar dari sebuah garis atau kurva, seperti halnya suatu padatan lebih besar dari sebuah permukaan.

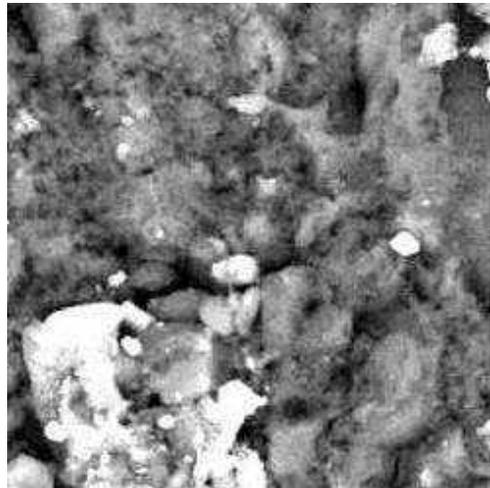
Batubara peringkat *lignit-subbituminous* di dominasi oleh makropori (Flores, 2014).

Batubara peringkat *bituminous* pada umumnya struktur porinya akan teratur baik ukuran, bentuk, dan sebarannya teratur. Adanya hubungan antara mikropori dengan peringkat batubara yang akan menyebabkan porositas berubah, pada peringkat *lignite – subbituminous* makropori lebih dominan sehingga menyebabkan porositas batubara semakin naik, pada peringkat batubara *bituminous* lebih dominan mikropori dan mesopori sehingga menyebabkan porositas batubara semakin kecil. Hal ini dapat dilihat dari hasil analisis laboratorium, batubara peringkat *lignite – subbituminous* mempunyai porositas (3,36% - 3,64%), sementara porositas pada batubara peringkat *bituminous* (2,36% - 2,66%).

Menurut Moore, 2008 menerangkan bahwa kapasitas serap (*adsorption capacity*) lebih besar dibanding dengan volume gas (*gas content*). Porositas memberikan informasi mengenai kapasitas simpan gas dalam batubara, sementara porositas juga akan memberikan informasi tentang struktur pori yang ada pada batubara.

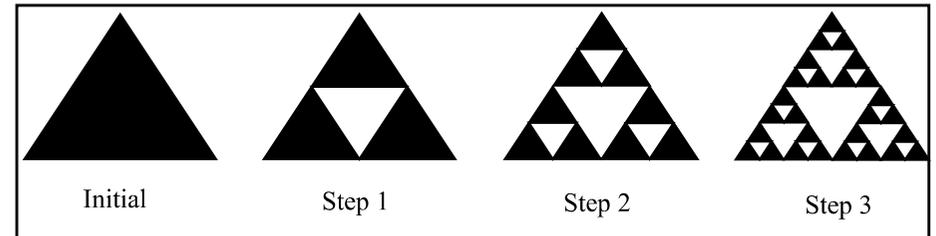


Gambar 19. Foto hasil SEM pada batubara peringkat *subbituminous* dengan perbesaran 2000 x



Gambar 20. Foto hasil SEM pada batubara peringkat *bituminous* dengan perbesaran 2000 x

Fraktal dicirikan oleh dimensinya dalam bentuk pecahan. Dengan dimensi tersebut, fraktal memiliki bentuk semacam “transisi” antara benda-benda yang berdimensi sesuai definisi *Euclidean*. Contoh fraktal untuk segitiga Sierpinski dapat dilihat pada Gambar 2.

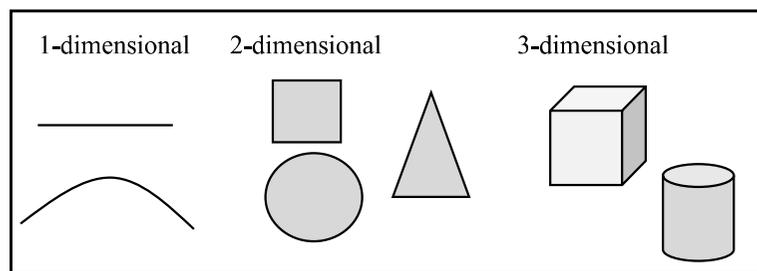


Gambar 2. Model Segitiga Sierpinski (Kusumayudha, 2005)

Sebagai contoh dengan segitiga terisi pada gambar diatas dimulai dengan menghubungkan titik tengah masing-masing sisi dan melepaskan segitiga tengah kemudian ulangi proses ini, bentuk yang muncul disebut segitiga *Sierpinski*. Pada gambar diatas menunjukkan kesamaan diri setiap bagian dari segitiga akan terlihat identik dengan keseluruhan. Sebenarnya, dapat mengatakan bahwa segitiga Sierpinski mengandung tiga salinan dari dirinya sendiri, masing-masing

setinggi dan sebesar aslinya. Masing-masing salinan itu berisi tiga salinan itu sendiri.

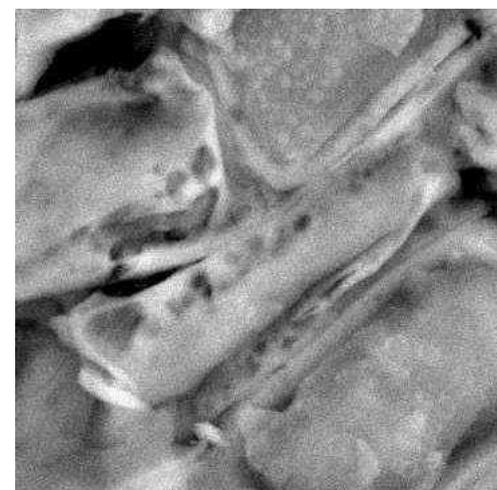
Ada tiga jenis dimensi *Euclidean* yaitu: garis 1 dimensi hanya memiliki panjang, kotak dan lingkaran adalah 2 dimensi, karena memiliki panjang dan lebar, menggambarkan luas. Benda seperti kotak dan silinder memiliki panjang, lebar, dan tinggi, menggambarkan volume, dan 3 dimensi. (Gambar 3).



Gambar 3. Bentuk Geometri *Euclidean*

Dalam fraktal, dimensi biasa dilambangkan dengan D yang menyatakan dimensi topologi pada setiap objek fraktal. Banyaknya subunit atau subsegmen hasil iterasi dari suatu objek fraktal dilambangkan dengan N . Sedangkan panjangnya subsegmen tersebut dilambangkan dengan r . Sehingga hubungan antara D , N , dan r dinyatakan sebagai berikut: $N = (r)^D$

Peringkat batubara mempengaruhi struktur pori (ukuran, bentuk, dan sebaran) pori batubara, perubahan peringkat batubara akan menyebabkan perubahan struktur pori batubara. Batubara peringkat lignite – subbituminous akan mempunyai struktur pori yang tidak teratur baik itu ukuran pori, bentuk pori, dan sebaran pori (Gambar 18, 19, dan 20).



Gambar 18. Foto hasil SEM pada batubara peringkat *lignite* dengan perbesaran 2000 x

8. Pori-Pori Batubara

Salah satu karakteristik unik dari batubara sebagai reservoir gas adalah sifatnya yang heterogen dan merupakan media berpori. Pori-pori batubara mempunyai 2 (dua) pori secara garis besar yaitu: pori – pori fraktur batubara (*cleat*) dan pori – pori pada matrik batubara. Berdasarkan ukuran pori-pori batubara maka pori-pori batubara dikelompokkan menjadi: mikropori < 2 nm (nano meter), mesopori (2 – 50 nm), dan makropori (> 50 nm) (Flores, 2014). Makropori di dalam literatur-literatur disebut juga sebagai *cleat* atau fraktur. Pori-pori batubara secara umum didominasi oleh mikropori rata-rata 77%, 5 % berupa mesopori, 15% berupa makropori, sementara 3% berupa *cleat* atau fraktur (Susilowati dkk, 2015). Pori -pori batubara tergantung pada peringkat batubara dan komposisi maseral (Flores, 2014). Contoh batubara yang mengandung maseral *vitroinite* (litotipe *vitroin*) pada umumnya pori-pori yang terbentuk adalah mikropori dan maseral *inertinite* (litotipe *fusain*) berisi mesopori dan makropori (Flores, 2014). Berdasarkan Faiz dkk, 1992 mikropori berhubungan dengan kandungan mineral pada batubara, hal ini merupakan hasil dari penelitian di daerah batubara berumur Perm di Australia.

Dengan mengambil logaritma dari kedua ruas persamaan tersebut, dimensi dapat dicari dengan persamaan di bawah

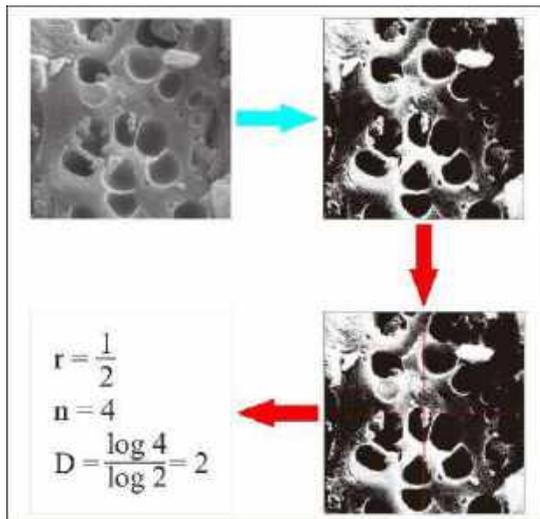
$$\text{ini: } D = \frac{\log N}{\log 1/r} \dots \dots \dots (1)$$

Ada beberapa algoritma untuk menentukan dimensi fraktal pori antara lain: Metode Eksponen Hurst dan *Box Counting* ,pada buku ini algoritma yang digunakan adalah: **Metode *Box Counting* Dimensi fraktal pori.**

Menurut Kusumayudha (2005) perhitungan dimensi fraktal pori lebih baik digunakan suatu metode secara umum (secara statistik) dapat menjelaskan sifat-sifat fraktal. Sebab, dimensi fraktal pori suatu sifat fisis benda yang sangat rumit sulit ditentukan dengan metode yang berbasis *similarity*, karena bentuk sifat fisis objek tersebut sulit diidentifikasi. Penentuan dimensi harus dilakukan secara keseluruhan tidak hanya bagian per bagian. Penentuan dimensi yang demikian dapat dilakukan dengan metode *box counting*. Jadi, dimensi *box counting* dapat diterapkan untuk sifat-sifat benda fisis benda *statistical self-similar fraktal*, *self-affine fraktal* dan *multy-fraktal* (fraktal yang berada di dalam fraktal) yang berbentuk sangat rumit tersebut dengan ketelitian yang tinggi.

Metode *box counting* sering dikenal sebagai metode perhitungan kotak. Langkah pertama bekerja dengan metode ini adalah dengan mengambil citra objek fraktal. Dari citra yang dihasilkan tersebut, kemudian dibagi-bagi menjadi beberapa kotak dengan berbagai variasi ukuran (r)

Salah satu contoh penentuan nilai r adalah 2^k , dengan $k = 0, 1, 2, \dots$ Dst, dan 2^k , lebih kecil dari ukuran citra. Gambar berikut menunjukkan ilustrasi metode *box-counting* (Gambar 4)



Gambar 4. Perhitungan manual metode *box counting* dengan

$$r = \frac{1}{2}$$

Tabel 6. Hasil uji HGI pada batubara peringkat *lignite – subbituminous* dan *bituminous*

Conto	HGI
<i>Batubara Lignite-Subbituminous</i>	
1	86
2	68
3	70
4	60
5	48
6	72
7	56
8	42
<i>Batubara Bituminous</i>	
1	41
2	40
3	39
4	38

Tabel 5. Nilai dimensi fraktal, porositas dan permeabilitas batubara peringkat *lignite – subbituminous*

Lignite - Subbituminous

Conto	Porositas %	Permeabilitas (mDarcy)	Dimensi fraktal pori (D)	Fraktal pori 3 dimensi (Dv)	Fraktal pori 2 dimensi (DI)
1	3,52	0,48	1,784	1,216	0,216
2	3,36	0,35	1,789	1,211	0,211
3	3,68	0,293	1,803	1,197	0,197
4	3,55	0,156	1,836	1,164	0,164
5	3,69	0,401	1,798	1,151	0,151
6	3,47	0,105	1,83	1,17	0,17
7	2,66	0,107	1,853	1,147	0,147
8	2,56	0,265	1,82	1,18	0,18

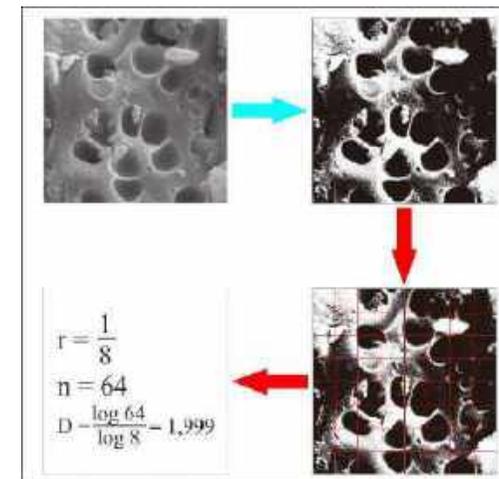
7.4 Hasil Uji HGI (Hardgrove Grindability Index)

Berdasarkan pengambilan conto batubara dilapangan diambil sebanyak 12 conto yang terdiri dari: 8 conto mewakili batubara peringkat *lignite – subbituminous* dan 4 conto mewakili batubara peringkat *bituminous*, adapun hasil uji HGI dapat dilihat pada **Tabel 6.**

Perhitungan frakta secara manual dengan *box counting* menggunakan ukuran kotak (r) 1/2, sehingga banyaknya kotak yang terisi adalah 4, sehingga dimensi fraktal yang di dapat $D = \log 4 / \log 2 = 2$ (Gambar 5).

Perhitungan dimensi frakta ke dua dengan ukuran kotak (r) = 1/4, sehingga banyaknya kotak yang melingkupi pori-pori adalah 16, sehingga nilai dimensi fraktal $D = \frac{\log 16}{\log \frac{1}{1/4}} =$

$$\frac{\log 16}{\log 4} = 2.$$

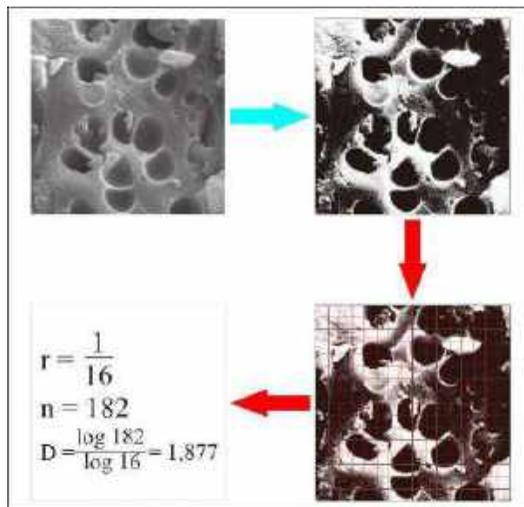


Gambar 5. Perhitungan manual metode *box counting* dengan $r = \frac{1}{4}$

Perhitungan dimensi fraktal ketiga dengan ukuran kotak (r) = 1/16, banyaknya kotak yang menutupi pori adalah 128

(Gambar 6). sehingga nilai dimensi fraktal $D = \frac{\log 128}{\log \frac{1}{1/16}} =$

$$\frac{\log 128}{\log 16} = 1,875.$$



Gambar 6. Perhitungan manual metode *box counting* dengan

$$r = \frac{1}{16}$$

Perhitungan dimensi fraktal keempat dengan ukuran kotak (r) = 1/32, banyaknya kotak yang menutupi pori adalah

subbituminous dengan umur formasi pembawa batubara Miosen – Pliosen. Contoh pada batubara peringkat *bituminous* diambil sebanyak 4 (empat) yang terdiri dari 1 conto lapisan batubara atas, 2 conto lapisan batubara tengah, dan 1 conto lapisan batubara bawah. Hasil analisis dimensi fraktal dapat dilihat pada **Table 4 dan 5**.

Tabel 4. Nilai dimensi fraktal, porositas dan permeabilitas batubara peringkat *bituminous*

Bituminous

Conto	Porositas, %	Permeabilitas (mDarcy)	Dimensi fraktal pori (D)	Fraktal pori 3 dimensi (Dv)	Fraktal pori 2 dimensi (DI)
1	2,51	0,341	1,896	1,11	0,11
2	2,63	0,221	1,91	1,09	0,09
3	2,38	0,356	1,895	1,11	0,11
4	2,64	0,12	1,92	1,08	0,08

Tabel 3. Hasil uji serapan gas metana pada batubara peringkat *lignite – subbituminous* dan *bituminous*

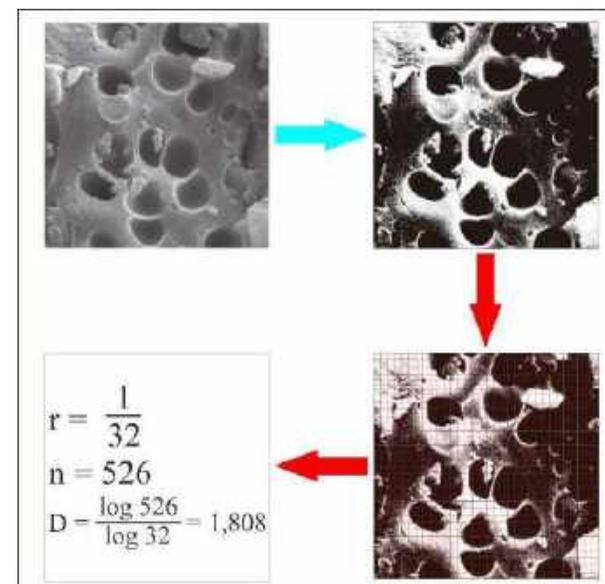
Conto	Peringkat batubara	Depth	Hydrostatic pressure at seam depth (psi)	Adsorbed CH4 storage capacity at seam depth Scf/ton		Vol. Langmuir scf/t	Press. Langmuir psi
				as recieve	daf		
1	<i>Lignite-Subbituminous</i>	224,00	329	147	203	216	284
3		329,00	483	162	205	238	298
5		746,00	1096	166	220	318	748
8		1264,00	1857	182	224	348	919
1	<i>Bituminous</i>	3240,00	4760	294	326	432	1018
2		3260,00	4789	315	336	466	1072
3		3270,00	4804	431	450	856	2220
4		3282,00	4822	425	576	826	2264

7.3 Analisis Dimensi Fraktal

Conto batubara yang digunakan untuk analisis dimensi fraktal sebanyak 12 conto yang terdiri dari 8 (delapan) conto diambil pada batubara dengan peringkat *lignite –*

526 (Gambar 7). sehingga nilai dimensi fraktal $D = \frac{\log 526}{\log \frac{1}{1/32}} =$

$$\frac{\log 526}{\log 32} = 1,808.$$



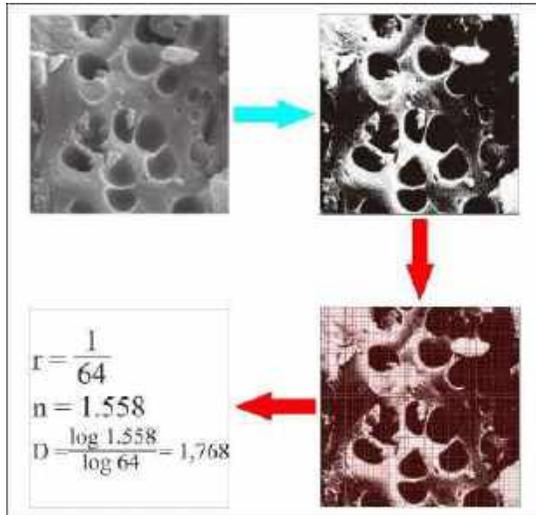
Gambar 7. Perhitungan manual metode *box counting* dengan

$$r = \frac{1}{32}$$

Perhitungan dimensi fraktal ke lima dengan ukuran kotak (r) = $1/64$, banyaknya kotak yang menutupi pori adalah 1558

(Gambar 8). sehingga nilai dimensi fraktal $D = \frac{\log 1588}{\log \frac{1}{1/64}} =$

$$\frac{\log 1558}{\log 64} = 1,768.$$



Gambar 8. Perhitungan manual metode *box counting* dengan

$$r = \frac{1}{64}$$

Perhitungan dimensi fraktal ke tujuh dengan ukuran kotak (r) = 1/128, banyaknya kotak yang menutupi pori adalah 4956 (Gambar 9). sehingga nilai dimensi fraktal $D =$

$$\frac{\log 4956}{\log \frac{1}{128}} = \frac{\log 4956}{\log 128} = 2,87.$$

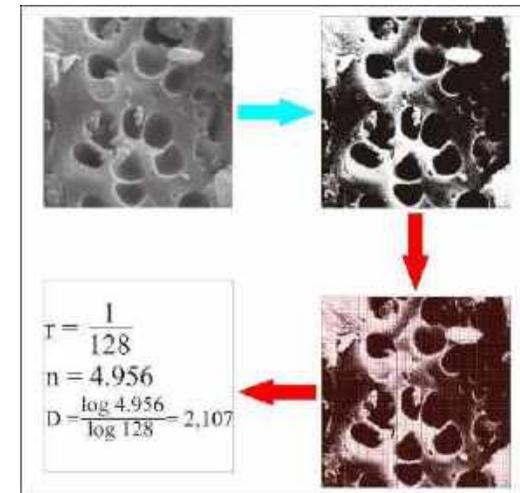
Tabel 2. Hasil analisis proksimat batubara *lignite* – *subbituminous* dan batubara *bituminous*

Sampele	Ari Lembab (% ,adb)	Abu (% , adb)	Zat Terbang (% , adb)	Karbon padat (% , adb)	Nilai kalori (Kcal/kg,adb)	Total bebarang (% ,adb)
Batubara lignite-bituminous						
1	23,02	2,18	39,94	34,86	4.833	0,08
2	17,00	1,2	44,94	36,86	5493	0,13
3	15,99	1,76	43,88	38,37	5200	0,08
4	19,71	1,64	40,47	38,18	5168	0,09
5	17,22	7,32	38,6	36,86	4908	0,17
6	18,75	2,89	41,42	36,94	5330	0,1
7	23,22	2,18	39,3	35,3	5082	0,08
8	13,7	1,23	46,56	38,51	6090	0,1
Batubara bituminous						
1	3,74	2,56	48,75	44,95	7756	0,41
2	2,51	14,94	45,26	37,29	6722	0,32
3	3,7	5,44	43,16	47,7	7318	0,39
4	2,91	23,16	38,02	35,91	6936	0,44
Standard	ASTM D.3173	ASTM D.3174	ASTM D.3175	ASTM D.3172	ASTM D.5865	ASTM D.4239

kecil dibanding dengan batubara *lignite - subbituminous* , kadar abu dan zat terbang di batubara peringkat bituminous lebih besar dibanding dengan kadar abu di batubara *lignite - subbituminous* . Nilai karbon di batubara *lignite - subbituminous* lebih kecil dibanding dengan batubara peringkat *bituminous*.

7.2 Analisis Serapan Gas Metana

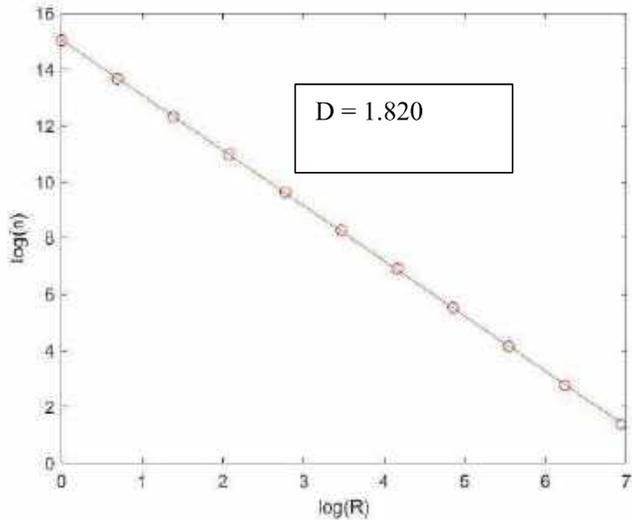
Untuk menguji serapan gas metana pada batubara dilakukan sebanyak 8 (delapan) conto batubara dengan rician sebagai berikut: 4(empat) conto diambil pada batubara peringkat *lignite – subbituminous* pada formasi pembawa batubara berumur Miosen, sedang 4 (empat) conto diambil pada formasi pembawa batubara berumur Eosen. Hasil uji serapan gas dari batubara diatas dapat dilihat pada **Tabel 3** sebagai berikut:



Gambar 9. Perhitungan manual metode *box counting* dengan

$$r = \frac{1}{128}$$

Perhitungan dimensi fraktal selanjutnya adalah sangat tergantung pada banyaknya kotak yang menyelimuti pori pori batubara. Selanjutnya untuk menghitung dimensi fraktal dibuat persamaan regresi yang merupakan fungsi dari log N dan log R. (Gambar 10).



Gambar 10. Hasil plot *Box Counting*, hubungan antara jumlah kotak dengan sisi kotak

Menurut Deng, (2018) apabila media berpori-pori bersifat 2 dimensi (luas) maka rumus dimensi fraktal (Dl) pada luas pori-pori menggunakan persamaan:

$$Dl = 2 - k \dots \dots \dots (2)$$

Sedang untuk media berpori-pori bersifat 3 dimensi (volume) maka dimensi fraktal (Dv) pada volume pori-pori menggunakan persamaan:

$$Dv = 3 - k \dots \dots \dots (3)$$

23,02% (adb), *ash* (kadar abu) 1.2% - 2.18% (adb), *volatile matter* (zat terbang) 39.94 % – 44.86 % (adb), *fixed carbon* (karbon padat) 34.86% - 36.86% (adb), *calories* (nilai kalori) 4833 – 5493 cal/gr, adb, *sulfur* (total belerang) 0.08 % - 0.13% (adb). Batubara peringkat *subbituminous* mempunyai kadar *moisture* (air lembab) antara 17.22 % - 23,22% (adb) , *ash* (kadar abu) 2.2 % - 7.32 % (adb), *volatile matter* (zat terbang) 39.09 % – 41.42 % (adb), *fixed carbon* (karbon padat) 35.3 % - 38.18 % (adb), *calories* (nilai kalori) 4740 – 5330 cal/gr, adb, *sulfur* (total belerang) 0.07 % - 0.17 % (adb).

Batubara peringkat bituminous mempunyai kadar *moisture* (air lembab) antara 2.51 % - 3.74 % (adb), *ash* (kadar abu) 2.56 % - 23.16 % (adb), *volatile matter* (zat terbang) 38.02 % – 48.75 % (adb), *fixed carbon* (karbon padat) 35.91 % - 47.7 % (adb), *calories* (nilai kalori) 6722 – 7756 cal/gr (adb), *sulfur* (total belerang) 0.32 % - 0.44 % (adb). Hasil selengkapnya dari analisa proksimat dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2 menunjukkan ada perbedaan antara batubara peringkat *lignite - subbituminous* dengan batubara peringkat *bituminous*, Batubara *bituminous* nilai kadar air lembab lebih

7. Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada batubara peringkat *lignite – subbituminous* dan batubara *bituminous*, adapun pengambilan conto batubara dilakukan dengan cara *channel sampling*. Tahapan berikutnya conto batubara di lakukan preparasi untuk digunakan berbagai macam analisis antara lain: kualitas batubara, serapan gas metana, *scan electronic microscopy* (SEM), dan porositas serta permeabilitas. Adapun hasil dari analisis-analisis diatas sebagai berikut:

7.1 Analisis Proksimat Batubara

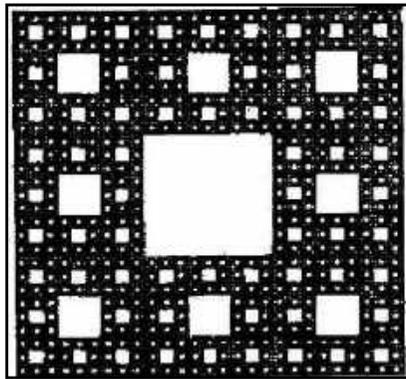
Analisis ini digunakan untuk mengetahui karakteristik dan kualitas batubara, conto batubara dilakukan untuk uji proksimat meliputi batubara peringkat *lignite – subbituminous* sebanyak 8 conto. 8 conto diambil dari lapisan batubara paling atas sampai bawah pada formasi batubara pembawa batubara berumur Miosen, 4 conto diambil pada formasi pembawa batubara yang berumur Eosen.

Berdasarkan hasil uji laboratorium pada batubara peringkat *lignite – subbituminous*. Peringkat batubara *lignite* hasilnya sebagai berikut : kadar *moisture* (air lembab) antara 17 % -

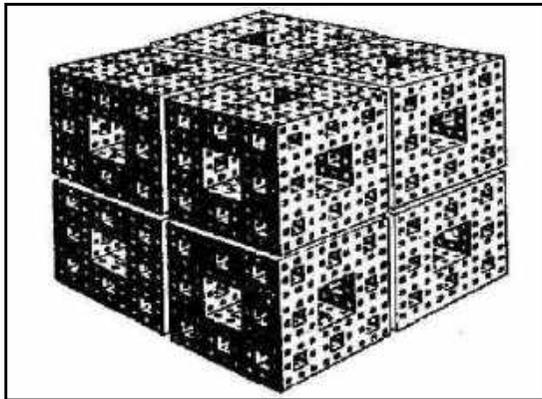
Dimana $D = -k$, k ditentukan dari kemiringan (slope) hasil pengeplotan harga $Nr(F)$ terhadap r dengan sumbu x merupakan $\log r$, dan sumbu y adalah $\log Nr(F)$. (Gambar 10).

Dimensi fraktal pori dapat diperoleh dengan menghitung kecuraman kurva D , yaitu $D=1.820$.

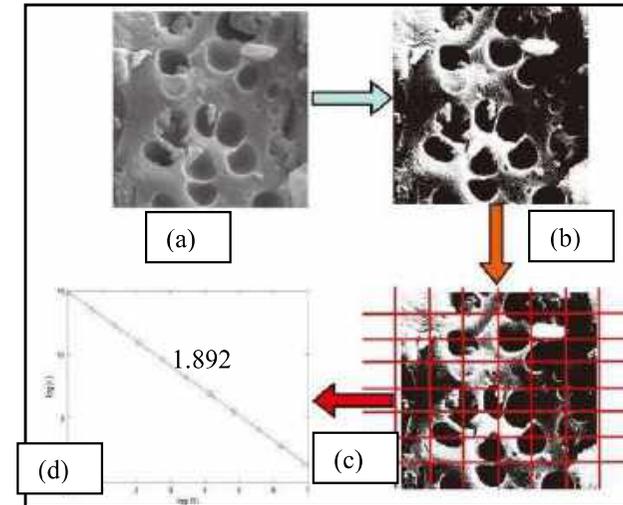
Media berpori-pori dua dimensi dapat dimodelkan dengan *sierpinski carpet* (Gambar 11) dengan $D = 1,89$ ($N=8$, $r=3$) sedangkan tiga dimensi dimodelkan dengan *merger sponge* (Sahimi & Yortsos, 1990 dalam Kusumayudha, 2005) dengan $D = 2,27$ ($N=12$, $r=3$). *Sierpinski carpet* mewakili porositas ruang antar butir (*porositas matriks*) dan rekahan (*cleat*). Batubara mempunyai porositas berupa *cleat* dan pori-pori antar matrik, model fraktal porositasnya merupakan modifikasi *menger sponge* menjadi *fissured menger sponge*. Model ini mempunyai harga $N = 8$ dan $r =2$ sehingga dimensinya =3 (Gambar 12).



Gambar 11. Model Fraktal *Double Porosity* (matriks dan rongga) *Sierpinski Carpet* (Kusumayudha, 2005)



Gambar 12. Model fraktal *triple porosity* (matriks, rekahan, dan rongga) *fissured menger sponge* (kusumayudha, 2005)



Gambar 17. Prosedur mencari dimensi fraktal pori (d) dari contoh : (a). foto *gray scale* dari sem , (b) *citra binary*, (c) *citra di tutup box*, (d) hasil dimensi fraktal pori.

0 *pixel* (hitam) dan batas tepi pori-pori padatan diberi nilai 254 *pixel* (putih) (Gambar 17). Perhitungan dimensi fraktal pori menggunakan metode *box counting*, dimensi biasa dilambangkan dengan D yang menyatakan dimensi topologi pada setiap objek fraktal. Banyaknya subunit atau subsegmen hasil iterasi dari suatu objek fraktal dilambangkan dengan N , sedangkan panjangnya subsegmen tersebut dilambangkan dengan r , sehingga hubungan antara D , N , dan r dinyatakan sebagai berikut: $N = (r)^D$, dengan mengambil logaritma dari kedua ruas persamaan tersebut, dimensi dapat dicari dengan persamaan di bawah ini:

$$D = - \lim_{r \rightarrow 0} \log N(r) / \log r \quad \dots\dots\dots(6)$$

Dimana $\log(N_r)$ adalah jumlah kotak yang menutupi pori-pori, $\log(r)$ adalah ukuran panjang pori-pori sisi kotak. Perhitungan dimensi fraktal 3 dimensi (D_v) digunakan untuk mengetahui dimensi volume pori-pori menggunakan **rumus**

3.

4. Gas Metana Batubara

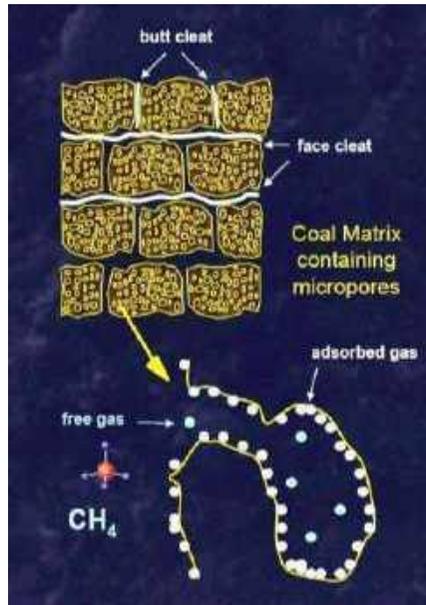
Gas batubara adalah gas alam pada batubara atau diistilahkan gas yang terserap pada batubara. Gas batu-bara tersusun atau komponen molekul dan isotopi dengan metana sebagai komponen utama dan karbon diokasida serta nitrogen sebagai komponen minor (Flores, 2014).

Gas metana terbentuk selama proses pembentukan batu-bara dan terperangkap di dalam batubara. Faktor-faktor yang mempengaruhi keberadaan gas metana adalah evolusi tektonik, kedalaman, peringkat batubara, ketebalan batubara, kandungan gas, permeabilitas, tekanan reservoir, tekanan desorpsi, dan kondisi hidrogeologi.

Menurut Flores, 2014 kandungan gas metana tersimpan pada permukaan batubara dari sistem pori batubara yang berupa pori-pori pada matrik melalui mekanisme adsorpsi.

Berdasarkan pendapat diatas hampir 97% keberadaan gas metana tersimpan dalam permukaan pori-pori matrik pada batubara (Gambar 13).

Proses terserapnya gas metana pada permukaan pori-pori batubara dikontrol oleh tekanan dan temperatur (Flores, 2014). Peningkatan temperatur akan menyebabkan proses penyerapan gas batubara berkurang, sedang peningkatan



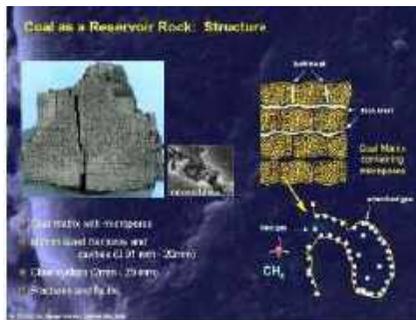
Gambar 13. Keberadaan gas pada pori-pori matrik batubara

tekanan menyebabkan bertambahnya penyerapan gas. Perubahan kematangan batubara mengakibatkan perubahan penyerapan gas metana, pada batubara dengan tingkat kematangan yang rendah juga akan menyebabkan penyerapan gas kecil, sementara batubara dengan kematangan tinggi menyebabkan penyerapan gas besar. Hal ini disebabkan karena perubahan kematangan batubara akan

preparasi yang sudah disiapkan. Bahan yang digunakan adalah isolasi yang bahanya dari karbon, selanjutnya conto tersebut dilapisi menggunakan platina agar supaya conto batubara konduktif. Conto preparasi yang sudah diberi platina kemudian diberi tekanan di bawah 6 PA selama 80 detik. Conto preparasi selanjutnya siap di lakukan analisis menggunakan alat SEM.

Pada tahap pengolahan citra conto di analisis dengan SEM, kemudian conto dilakukan *scanning* dengan sumber arus yang cukup besar 50 μ A dengan sumber tegangannya 60 kV, lama pencahayaan 8 detik. Citra yang dihasilkan dari proses *scanning* berupa citra digital. Citra dari conto dalam bentuk skala keabuan (*grayscale*). Proses selanjutnya adalah dilakukan pengolahan citra dengan menggunakan **program fraktal versi Sugeng, 2020** dibuat oleh peneliti di jalankan di *software Matlab*. Proses ini membedakan antara padatan dan pori-pori-pori-pori batubara dengan mengubah citra keabuan menjadi citra biner dilakukan *thresholding*. Citra biner ini berfungsi untuk membedakan antara pori-pori berwarna hitam dan tepi padatan butiran berwarna putih. Setiap daerah batas tepi pori-pori berwarna hitam diberi nilai

menempati ruang pori-pori sebesar 2,34% - 4.16%. Pori-pori makro dan mesopori-pori akan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya peringkat batubara ($R_o > 1.0\%$), sedangkan mikropori-pori dan pori-pori transisi berbanding terbalik. Penyerapan pori-pori di batubara pada *micropores*, pori-pori transisi dan mesopori-pori, dengan proporsi masing-masing 2,64% - 61.54%, 30,77% -72.72% dan 7,65% -37.31%.



Gambar 16. Porositas *Macro Cleat*, *Micro Cleat*, dan Matrik (Mucharam, 2007)

6. Scan Electronic Microscopy (SEM) Batubara

Tahapan preparasi conto sebagai berikut: conto di *crushing* kemudian hasil dari *crushing* diayak menggunakan *mesh 60*. Conto yang lolos *mesh 60* kemudian ditabur di tempat

menyebabkan perubahan struktur pori di matrik pada batubara. Perubahan struktur pori batubara menyebabkan daya serap gas batubara pada masing masing batubara berbeda. Struktur pori meliputi ukuran pori, bentuk pori, dan penyebaran pori pada batubara berbeda beda. Batubara dengan tingkat kematangan rendah secara umum akan mempunyai ukuran pori besar, bentuk pori tidak teratur, dan penyebaran pori juga tidak teratur sehingga penyerapan pada batubara ini kecil, sebaliknya pada batubara dengan kematangan tinggi mempunyai ukuran pori kecil, bentuk pori teratur, penyebaran pori merata sehingga batubara pada kematangan ini akan menyerap gas lebih besar.

Kemampuan batubara untuk menyerap batubara disebut sebagai kapasitas serap, sedang volume gas yang terkandung dalam batubara disebut sebagai kandungan gas (*gas content*). Menurut Moore, 2012 kandungan gas akan lebih kecil bila dibanding dengan penyerapan gas.

Model *sorption* untuk menjelaskan penyerapan gas di dalam batubara pada umumnya menggunakan persamaan *Langmuir*. Pada penelitian menggunakan conto batubara dari peringkat *Lignite – Bituminous*, sementara gas yang

digunakan adalah gas metana murni. Alat yang digunakan untuk analisis *adsorption* gas metana terdiri dari:

1. Tabung gas ada 3: 1. Gas metana, 2. Gas Helium, 3. Gas CO₂
2. Tabung conto berjumlah 4.
3. *Oven Isotherms*
4. Tabung pressure transmitter
5. *Alat coal bed methane isotherms*
6. CPU dan layar monitor.

Prosedur analisis *adsorption* gas metana

1. Conto batubara diambil 250 gram, selanjutnya dihancurkan dengan alat penghancur hingga berujud bubuk berukuran butir lolos bukaan saringan (*screen*) 0.212 mm (#80 mesh).
2. Uji kebocoran tabung *pressure transmitter* untuk menguji kebocoran digunakan gas *Helium* (He) yang dimasukkan ke dalam tabung *pressure transmitter*. Pada layar monitor di coal bed methane akan menunjukkan angka - angka berubah ubah, setelah beberapa lama angka di monitor akan stabil artinya angka sdh stabil. Selanjutnya mengisi gas He pada alat tabung *pressure transmitter* (Gambar 14) sampai penuh

Transmisi microscopy electron (TEM), Resonansi magnetic nuklir (NMR), dan distribusi neutron *small angle* (SANS). Berdasarkan penelitian dengan metode diatas menunjukkan bahwa dalam batubara peringkat *Lignite-Sub Bituminous* berkembang umumnya meso dan makro pori-pori lebih tinggi, sedang batubara peringkat tinggi porositas meso dan makro pori-pori terbatas (Liu & Nie, 2016).

Porositas batubara berhubungan dengan komposisi dan peringkat batubara (Flores, 2014). *Macropores* secara umum terdapat pada batubara *Lignite-Sub Bituminous*, sementara *micropores* terdapat pada batubara peringkat tinggi. (Flores, 2014). Porositas pada batubara *Lignite-Sub Bituminous* porositasnya mulai dari 2,7% meningkat menjadi 6,3% pada batubara peringkat tinggi

Analisis distribusi ukuran pori-pori menunjukkan bahwa *micropores* dengan radius pori-pori <8 nm dan transisi pori-pori dengan radius pori-pori antara 8 - 80 nm mendominasi ruang pori-pori batubara sebesar 64,82% - 91.50%, diikuti oleh makro pori-pori dengan radius > 800 nm, dengan ruang pori-pori sebesar 5,35% -22.69% dan mesopori-pori dengan radius pori-pori antara 80 dan 800 nm,

rekahan pada batubara sangat dipengaruhi oleh jarak antar rekahan, tinggi, lebar bukaan, dan mineral pengisi bukaan. Jarak antar rekahan semakin berkurang bila tingkat kematangan batubara semakin meningkat, semakin matang maka porositasnya lebih baik. Disamping itu batubara dengan kadar abu kecil cenderung memiliki jarak *cleat* lebih kecil daripada batubara dengan kadar abu tinggi (Laubach, 1998). Hadirnya *cleat* pada batubara akan memperbaiki permeabilitas, semakin tinggi peringkat batubara maka semakin bagus permeabilitasnya sampai pada peringkat tertentu.

Pori-pori dalam matrik adalah tempat utama untuk penyerapan gas, yang tidak bergantung pada permeabilitas (Gambar 16). Batubara mempunyai struktur pori-pori lebih kompleks dan tidak homogen daripada struktur pori-pori dibatuan lainnya. Pori-pori - pori-pori pada matrik mempunyai dimensi tidak seragam karena sangat dipengaruhi oleh tingkatan batubara, maseral batubara, dan kualitas batubara.

Metode penyelidikan porositas sudah dilakukan adalah: porosimeter merkuri, *Scanning microscopy electron* (SEM),

dengan cara membuka *valve* helium dan *valve* tabung *pressure transmitter* serta mengalirkan gas He ke dalam alat tersebut, selanjutnya mencatat temperatur (T_1) dan tekanan (P_1) tabung *pressure transmitter*. Selanjutnya diamati pada tabung *pressure transmitter* apakah ada kebocoran atau tidak, jika tidak ada kebocoran selanjutnya mengeluarkan gas He dari *cylinder* dengan menyalakan *vacuum pump*.

3. Tahapan analisis penyerapan gas metana di batubara dilakukan berdasarkan metode volumetrik untuk menentukan kapasitas serap (*sorption capacity*) sebagai fungsi tekanan.

Mengacu metode volumetrik dari *Commonwealth Scientific dan Industrial Research Organization* (CSIRO) Australia, pada metode ini volume gas metana (CH_4) terserap percontonya diukur secara tidak langsung dengan menginjeksikan gas metana secara bertahap dengan tekanan bervariasi hingga tekanan 16 Mpa (2320 psi) dengan temperatur bervariasi. Alat ini dioperasikan dengan cara komputer dengan perangkat lunak CSIRO *Adsorption isotherm system*, sehingga tekanan saat penginjeksian gas CH_4 dapat dikontrol.

Hubungan *volume - pressure* pada temperatur tertentu (*sorption isotherm*) dapat digunakan untuk mengetahui kapasitas simpan gas dan memperkirakan volume gas yang dapat lepas (*release*) dari perconton sejalan dengan penurunan tekanan reservoir. Secara umum hubungan antara kapasitas penyerapan gas dengan tekanan dikenal sebagai persamaan Langmuir:

$$G_s = \frac{V_L \times P}{P_L + P} \dots\dots\dots (4)$$

- Dimana:
 G_s = Kapasitas gas simpan, m³/ton
 P = Tekanan, kPa
 V_L = Konstanta Serapan gas metana, m³/ton
 P_L = Konstanta Tekanan Langmuir, kPa

Persamaan diatas hanya digunakan dengan asumsi batubara murni (*pure coal*) sehingga persamaan ini kemudian dimodifikasi dengan memperhitungkan adanya kadar abu dan kadar air yang terkandung dalam batubara, sehingga persamaan ini menjadi:

$$G_s = (1 - f_a - f_m) \frac{V_L \times P}{P_L + P} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana: f_a = kadar abu

pori i meso (diameter 80 – 800 nm) dan pori-pori - pori-pori makro (> 800nm) (Yao, 2006 dalam Yao et al , 2009) .

Pori-pori makro dan meso disebut juga pori-pori - pori-pori berupa *cleat*. Pori-pori - pori-pori ini memungkinkan rembesan gas secara turbulen maupun laminar terus menerus. Karakteristik pori-pori- pori-pori batubara pada lapisan batubara tergantung pada sifat fisik batubara seperti tipe maseral, peringkat batubara, dan *cleat* (Weniger et al, 2015). *Cleat* merupakan rekahan pada lapisan batubara yang terbentuk pada saat pembatubaraan. *Cleat* pada batubara dibagi menjadi *face cleat* dimana rekahan pada batubara tegak lurus dengan jurus lapisan batubara dan *butt cleat* rekahan pada lapisan batubara sejajar dengan kemiringan lapisan batubara. Berdasarkan jarak antar *cleat* Ammosov dan Eremin (1963) dalam Acosta et al, (2007) membagi menjadi 3 kelompok: *macrocleat* satuan dalam desimeter – centimeter, *meso cleat* ukuran satuan dalam milimeter, dan *micro cleat* ukuran satuan dalam mikrometer.

Rekahan alami pada batubara (*cleat*) adalah satu-satunya atribut fisik terpenting yang mengatur aliran gas di reservoir CBM (Moore, 2012). Kemampuan cairan atau gas melalui

memiliki struktur tidak seragam dan geometri permukaan tidak beraturan.

Geometri ruang pori-pori (distribusi, ukuran, dan bentuk pori-pori atau struktur pori-pori) batubara mempengaruhi perilaku batubara sebagai batuan reservoir untuk gas. Struktur pori-pori tidak hanya mempengaruhi transportasi gas dalam lapisan batubara, tapi juga mekanisme adsorpsi dan penyimpanan gas (Clarkson & Bustin, 1999; Gilman dan Beckie, 2000; Karacan dan Okdanan, 2001; Radovic et al, 1997; Yao dan Liu, 2007 dalam Hao et al, 2013).

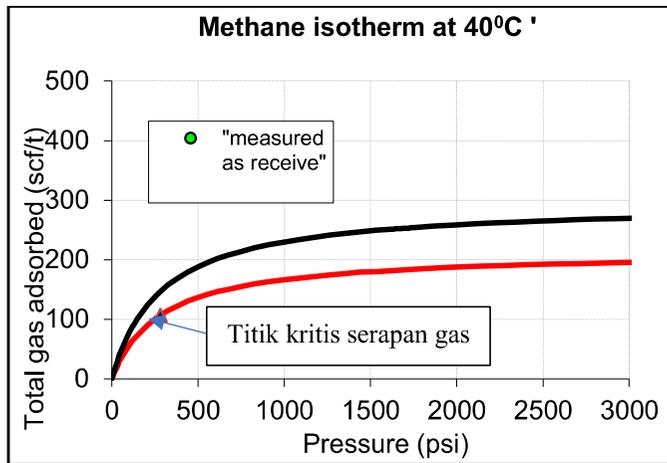
Berdasarkan klasifikasi pori-pori dalam *International Union of Pure and Applied Chemistry* ada 3 (tiga) pori-pori yaitu mikropori-pori diameter < 2 nm, mesopori-pori diameter 2 – 50 nm, dan makropori-pori diameter > 50 nm (Orr, 1977). Pori-pori pada batubara dapat dikelompokkan menjadi pori-pori mikro (0 – 8 nm), transisi (8 – 80 nm, meso (80 – 800 nm), dan makro (> 800 nm) (Hodot, 1996 dalam Hao, 2013). Berdasarkan penyimpanan dan penyerapan gas metana batubara sistem pori-pori batubara secara umum dibagi menjadi pori-pori mikro (diameter kurang dari 8 nm), pori-

$$f_m = \text{Kadar air}$$

Hasil uji adsorption isotherm ditampilkan dalam bentuk kurva Langmuir sebagai hubungan antara kapasitas simpan gas dengan tekanan (Gambar 15).



Gambar 14. Tabung *Pressure Transmitter* dan *Oven Isotherm*



Gambar 15. Kurva antara tekanan dan volume serapan gas

Interpretasi membaca kurva diatas untuk menentukan kapasitas serap gas adalah dilihat dari titik kritis serapan gas, titik ini menunjukkan besarnya serapan gas minimal selanjutnya akan naik perlahan lahan selanjutnya akan konstan, pada saat kurva kosntan maka menunjukkan besarnya volume gas yang terserap pada batubara. Batubara dengan peringkat tinggi kurva akan cenderung naik tajam kemudian mendatar, sedang batubara peringkat rendah kurva akan cenderung lebih mendatar.

Batubara sebagai reservoir gas tidak terlepas dari peran struktur pori batubara, sementara ukuran pori sangat kecil, bentuk tidak teratur dan sebaran berbeda beda maka untuk mengkuantifikasi pori pada batubara dapat dilakukan dengan mengetahui dimensi fraktal pori.

5. Porositas batubara

Keberhasilan produksi gas metana batubara sangat tergantung pada tiga hal yaitu: laju aliran gas, harga gas, dan biaya pemboran (Moore, 2008). Laju aliran sangat tergantung pada permeabilitas dan persentase saturasi gas, permeabilitas batubara nilainya 0,1 mD – 800 mD, nilai saturasi gas antara 20 – 90 %.

Permeabilitas pada batubara sangat tergantung pada geometri ruang pori-pori (distribusi, ukuran, dan bentuk pori-pori atau parameter ini disebut struktur pori-pori), struktur pori-pori pada batubara sangat heterogen, ada dua system pori-pori di dalam batubara yaitu: *cleat* (termasuk rekahan) dan *mesopori-pori* serta *mikropori-pori* (Close, 1993; Shi & Durucan, 2003 dalam Cai et al, 2011). Pori-pori batubara terbentuk selama proses pembatubaraan yang kompleks dan